不同施钾水平对苜蓿营养物质及抗蓟马性的影响

张晓燕[1,2]，师尚礼[1,2]，李小龙[1,2]，李亚娟[1,2]，胡桂馨[1,2,*]

(1. 甘肃农业大学草业学院，兰州 730070；2. 草业生态系统教育部重点实验室，中-美草地畜牧业可持续发展研究中心，兰州 730070)

摘要：【目的】明确施钾是否能有效提高苜蓿对蓟马的抗性以及钾-营养物质-抗虫性之间的关系。【方法】以感蓟马紫花苜蓿 *Medicago sativa* 品种甘农 3 号(Gannong No. 3)和抗蓟马紫花苜蓿品种甘农 9 号(Gannong No. 9)为材料，设 0，6，9，12 和 15 g/m^2(K_2O)5 个钾水平，在大田蓟马为害高峰期，评价和测定了不同钾水平处理下苜蓿的受害指数、虫口数量、叶片钾含量、碳氮比和游离氨基酸变化。【结果】在第 2 茬中，随着钾水平的升高，甘农 3 号和甘农 9 号老叶和心叶的钾含量上升，可溶性糖和碳氮比升高，游离氨基酸含量下降，虫口数量无显著性差异，受害指数显著降低($P<0.05$)，且在 9 g/m^2(K_2O)水平下最低。在第 3 茬中，甘农 3 号和甘农 9 号的受害指数、叶片钾含量、碳氮比及游离氨基酸的变化规律和第 2 茬相同，但虫口数量上升。第 2 茬和第 3 茬中，不同施钾水平下，苜蓿叶片钾含量与受害指数负相关但不显著($P>0.05$)。施钾后甘农 3 号的受害指数均低于未施钾甘农 9 号的受害指数。【结论】钾元素可通过提高苜蓿碳氮比，降低游离氨基酸的含量来提高苜蓿对蓟马的耐害性。在大田条件下，通过施钾管理来提高苜蓿品种对蓟马的耐害性是一种有效的措施。

关键词：苜蓿；钾肥；蓟马；抗虫性；营养物质

中图分类号：Q965 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296(2016)08-0846-08

Effects of applied potassium levels on alfalfa nutrients and resistance to thrips (Thysanoptera: Thripidae)

ZHANG Xiao-Yan[1,2], SHI Shang-Li[1,2], LI Xiao-Long[1,2], LI Ya-Juan[1,2], HU Gui-Xin[1,2,*] (1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Aim】To determine whether potassium application can effectively improve the resistance of alfalfa to thrips and the relationship between potassium, nutrients and resistance to thrips. 【Methods】The changes in damage index, potassium content, thrips density, carbon to nitrogen ratio and free amino acid content in leaves of alfalfa (*Medicago sativa*) resistant to thrips (Gannong No. 9) and susceptible to thrips (Gannong No. 3) were evaluated and measured after application with different levels of potassium (0, 6, 9, 12, 15 g/m^2 K_2O) during the thrips damage peak in fields. 【Results】The potassium content, soluble sugar content and carbon to nitrogen ratio in old and heart leaves of Gannong No. 3 and Gannong No. 9 increased while the free amino acid content decreased with the potassium levels increasing, and the thrips density showed no significant change in the 2nd cutting of alfalfa. The damage index of alfalfa decreased significantly after application with potassium ($P<0.05$) and was the lowest at

基金项目：国家自然科学基金项目(31260579)；国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-35)

作者简介：张晓燕，女，1989 年生，甘肃景泰人，硕士研究生，研究方向为草地昆虫及害虫防治，E-mail：1226573428@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: huguixin@gsau.edu.cn

收稿日期 Received: 2016-04-10；接受日期 Accepted: 2016-07-11

the potassium level of 9 g/m^2 K_2O. The damage index, potassium content, carbon to nitrogen ratio and the free amino acid content in leaves of the 3rd cutting of alfalfa displayed the same change trend with those of the 2nd cutting after application with potassium. However, the thrips density increased as the potassium concentration increased. Correlation analysis indicated that the potassium content in leaves of the 2nd and 3rd cuttings of alfalfa had no correlation with the damage index. The damage index of Gannong No. 3 applied with potassium were lower than that of Gannong No. 9 without potassium application.【Conclusion】The potassium application enhances the resistance of alfalfa to thrips effectively by improving the carbon to nitrogen ratio and decreasing the free amino acid content. Therefore, the potassium application is an effective measure to enhance the tolerance of alfalfa to thrips in fields.

Key words: *Medicago sativa*; potassium fertilizer; thrips; insect resistance; nutrient

紫花苜蓿 *Medicago sativa* 为牧草之王,是各种食草类家畜的优良饲料,但苜蓿种植面积的逐年扩大和产业化程度的提升,为苜蓿病虫害的发生和流行创造了有利的生态条件(张蓉等, 2003; 杨青川和孙彦, 2011),其中以牛角花齿蓟马 *Odontothrips loti* 为优势种的蓟马类害虫一直是我国北方苜蓿生产的重要威胁和障碍,在苜蓿营养生长阶段,其主要在苜蓿心叶中取食为害,绝大部分苜蓿品种受害率均在95%以上(吴永敷等, 1990; 贺春贵, 2004; 寇江涛等, 2011)。由于苜蓿蓟马具有发育历期短、世代重叠严重、个体微小、取食隐蔽、对杀虫剂极易产生抗药性等特点,单一的化学防治措施难以取得理想的控制效果。通过土壤施肥调节植物的生长和生理状况,进而影响植食性昆虫的生长发育、繁殖和取食为害,对于减少化学农药的施用和害虫的可持续控制具有重要的意义(高东等, 2010; 庞淑婷和董元华, 2012)。土壤矿质元素不仅直接影响植物的生长发育,而且通过植物的营养物质及其代谢,包括植物体内糖、蛋白质以及氨基酸的合成与分解,对植物性昆虫、螨类等产生间接影响(Smith, 1993),其中矿质元素钾(potassium, K^+)不仅影响氮素代谢促进氨基酸和蛋白质的合成(韩玉龙, 2013),且在抑制作物病虫害发生方面有重要作用(Perrenoud, 1990)。戴小华等(2002)研究报道,美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 较喜欢选择低钾水平处理的植株,随着植株钾水平的提高,其选择性呈下降趋势。卢伟等(2007)研究表明,在施用较高浓度钾肥条件下,烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的发育历期显著延长、存活率显著下降。国内牧草及苜蓿的施肥管理主要侧重于如何提高产量和牧草品质,通过施肥管理控制苜蓿害虫的研究几乎没有报道。因此,研究揭示施肥对苜蓿抗虫性的影响及其作用机理,可为苜蓿重要害虫—蓟马的生态调控提供新的思路与途径。

本研究选用抗蓟马紫花苜蓿品种甘农 9 号(2013 年甘肃省牧草审定品种)和西北地区广泛种植但对蓟马抗性较低的甘农 3 号(胡桂馨等, 2007)为试验材料,在苜蓿大田蓟马为害高峰期(6 月下旬至 8 月下旬)(贺春贵, 2004),通过调查和测定探索不同施钾水平对苜蓿的受害指数和虫口数量以及两个品种心、老叶钾含量,碳氮比和游离氨基酸与苜蓿抗蓟马的关系的影响,阐明矿质元素钾对于影响苜蓿抗蓟马的作用。

1 材料与方法

1.1 供试苜蓿品种和虫源

苜蓿品种为感蓟马品种甘农 3 号(Gannong No. 3)和抗蓟马品种甘农 9 号(Gannong No. 9)。供试虫源为大田自然发生的蓟马复合种群。

1.2 试验地概况

试验于 2015 年 5 –9 月在甘肃农业大学兰州牧草试验站进行。试验站位于兰州市西北部,地处黄土高原西端,地理坐标为 105°41′E,34°05′N。海拔 1 525 m,属温带半干旱大陆性气候,年降水量 200 ~ 320 mm,年蒸发量 1 664 mm,年蒸发量是降水量的 5.2 ~8.3 倍。年均日照 2 770 h,年无霜期 90 ~210 d。年均气温 9.7℃,最热月平均气温 29.1℃,最冷月平均气温 –14.9℃, >0℃的年积温 3 800℃, >10℃的年积温 3 200℃。区内地势平坦,肥力均匀,土壤类型为黄绵土,黄土层较薄,土壤有机质含量 0.84%, pH 7.5,土壤含盐量 0.25%,有效氮 95.05 mg/kg,有效磷 7.32 mg/kg,有效钾 78.2 mg/kg。

1.3 试验设计

试验采用区组排列,设 3 个大区,每个大区一半播种甘农 3 号,一半播种甘农 9 号。两个品种均于 2014 年 5 月播种。2015 年 5 月 21 日第一茬刈割后

测土施钾。每个大区下设 5 个 K(K_2O)水平处理,分别为 0, 6, 9, 12 和 15 g/m^2。磷素和氮素均设一水平,分别为 12 g/m^2(P_2O_5)和 7.5 g/m^2(N),试验所用钾肥为硫酸钾(含 K_2O 60%),磷肥为过磷酸钙(含 P 44%),氮肥为国产的尿素(含 N46%)。施肥处理小区面积 2 m × 8 m。试验大区间土壤用宽 60 cm 铝塑板隔离,施肥处理小区用铝塑板隔离,深度为 40 cm,试验地四周用宽 60 cm 的铝塑板隔离。分别于 6 月 27 日和 8 月 16 日,第 2 茬和第 3 茬苜蓿蕾期,对两个苜蓿品种进行受害程度评价和虫口统计,并取苜蓿心叶和老叶(倒 3 叶和 4 叶)测其钾含量、可溶性糖、总氮含量、游离氨基酸含量。

1.4 受害程度的调查

每个肥料处理小区除去边际 50 cm,随机选取 20 个苜蓿枝条,统计每枝条苜蓿上部 20 cm 以内长度大于 4 mm 的叶片,分别统计其受害级别,按下式计算其受害指数(贺春贵等, 2007)。

受害指数 = [Σ(受害级叶片数 × 受害级值)/(调查总叶片数 × 受害最高级值)] × 100%。

1.5 虫口统计

每个肥料处理小区除去边际 50 cm,随机选取 20 个苜蓿枝条,3 次重复,将枝条上的蓟马抖动至白纸上,并分别统计蓟马成虫和若虫的总量。

1.6 钾含量测定

钾含量的测量采用火焰光度法(鲍士旦, 2000)。

1.7 总氮含量测定

氮含量的测量采用凯氏定氮法(鲍士旦, 2000)。

1.8 可溶性糖的测定

准确称取苜蓿样品 0.05 g,置于 1.5 mL 离心管中,加入 80% 乙醇 50 μL,于 80℃ 水浴浸提 30 min,冷却后于 4 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,向残渣中再加 80% 乙醇 950 μL,再次浸提,将 2 次提取的上清液合并。此提取液中含葡萄糖、果糖、蔗糖和低分子量果聚糖。测定时,取上述提取液 16 μL,加入蒸馏水 184 μL 和蒽酮试剂 100 μL,摇匀,置入沸水浴中显色 10 min,取出后立即冷却,于 625 nm 波长处测定吸光值。用 D-葡萄糖绘制标准曲线,浓度为 0, 3.125, 6.25, 12.5, 25 和 50 μg/mL(杜新慧, 2014)。

1.9 游离氨基酸的测定

采用水合茚三酮法测定。称取新鲜剪碎苜蓿叶片 0.05 g,置于 1.5 mL 离心管中,加入 10% 醋酸(无氨水配制)1 mL 研磨,离心,取上清 50 μL,用 pH 5.4 醋酸缓冲液定容至 1 mL,为待测液。吸取待测液 110 μL,加入茚三酮 163 μL 和 0.1% 抗坏血酸溶液 27 μL,盖上盖子,摇匀后置沸水浴中加热 15 min,取出间歇冷却 15 min,摇匀,在 580 nm 波长下比色,在标准曲线上查得氨基酸含量(以亮氨酸为标准)(杜新慧, 2014)。

1.10 数据处理

用 Excel 2007 软件进行数据整理,SPSS20.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果

2.1 不同施钾水平下苜蓿受害指数的变化

由表 1 知,在第 2 茬中,随着钾水平的升高,甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的受害指数均显著下降($P<0.05$),且均在 9 g/m^2(K_2O)水平下最低;12 和 15 g/m^2 水平下,两个苜蓿品种的受害指数均高于 9 g/m^{2}水平下的受害指数。第 3 茬与第 2 茬有相同的规律。在相同钾水平下,甘农 3 号受害指数显著高于甘农 9 号($P<0.05$),但施钾后的甘农 3 号受害指数均低于未施钾的甘农 9 号的受害指数。施钾处理下的甘农 3 号和甘农 9 号的受害指数均低于 0 g/m^{2}钾水平处理。

表 1 不同钾水平处理下甘农 3 号和甘农 9 号的受害指数(%)

Table 1 Damage index (%) of alfalfa Gannong No. 3 and Gannong No. 9 after exposure to different potassium levels

茬次 Cuttings	品种 Alfafa variety	钾浓度 Potassium levels (g/m^2 K_2O)				
		0	6	9	12	15
第 2 茬 2nd cutting	甘农 3 号 Gannong No. 3	68.91 ± 0.39 a	49.62 ± 0.79 c	36.11 ± 0.12 ef	37.16 ± 0.58 e	45.39 ± 1.79 d
	甘农 9 号 Gannong No. 9	55.87 ± 0.94 b	33.42 ± 1.38 fg	30.11 ± 1.31 g	32.94 ± 1.48 fg	37.43 ± 1.49 e
第 3 茬 3rd cutting	甘农 3 号 Gannong No. 3	84.77 ± 0.39 a	71.23 ± 1.05 b	58.68 ± 0.72 d	64.07 ± 0.60 c	67.18 ± 1.11 c
	甘农 9 号 Gannong No. 9	71.46 ± 1.41 b	64.07 ± 1.12 c	54.83 ± 1.60 e	64.86 ± 1.16 c	59.24 ± 0.93 d

数据为平均值 ± 标准误,同一茬次数据后不同小写字母表示不同品种和处理间差异显著($P<0.05$, Duncan 氏新复极差法)。Data are mean ± *SE*, and those of the same cutting followed by different letters are significantly different among different varieties and treatments ($P<0.05$, Duncan's new multiple range test).

2.2　不同施钾水平下蓟马虫口密度及其与受害指数的相关性

2.2.1　不同施钾水平下苜蓿蓟马虫口密度：由表 2 可见，在第 2 茬中，随着施钾水平的升高，甘农 3 号苜蓿的蓟马若虫密度显著下降（$P<0.05$），甘农 9 号的蓟马若虫密度下降但不显著（$P>0.05$）；两个苜蓿品种的蓟马成虫密度均呈上升趋势；蓟马成虫和若虫的总量在钾水平间无显著性差异（$P>0.05$）。第 3 茬中，除 6 g/m^2 水平，随着施钾水平的升高，甘农 3 号苜蓿的蓟马若虫密度显著上升（$P<0.05$），蓟马成虫密度下降，蓟马成虫和若虫的总密度呈上升趋势；除 9 g/m^2 水平，甘农 9 号的蓟马若虫、蓟马成虫及蓟马若虫和成虫的总密度变化均不显著（$P>0.05$）。

表 2　不同钾水平下甘农 3 号和甘农 9 号的蓟马虫口密度

Table 2　Change in the thrips density in alfalfa Gannong No. 3 and Gannong No. 9 after exposure to different potassium levels

品种 Alfalfa variety	钾浓度 Potassium levels (g/m^2 K_2O)	第 2 茬蓟马虫口密度(Number of thrips/branch) Thrips density in the 2nd cutting			第 3 茬蓟马虫口密度(Number of thrips/branch) Thrips density in the 3rd cutting		
		若虫 Nymph	成虫 Adult	若虫 + 成虫 Nymph + Adult	若虫 Nymph	成虫 Adult	若虫 + 成虫 Nymph + Adult
甘农 3 号 Gannong No. 3	0	1.63 ± 0.31 a	2.02 ± 0.03 bc	3.65 ± 0.27 a	2.06 ± 0.06 d	2.39 ± 0.05 a	4.45 ± 0.12 c
	6	1.17 ± 0.24 bc	2.51 ± 0.20 ab	3.67 ± 0.46 a	1.57 ± 0.04 e	2.31 ± 0.12 a	3.88 ± 0.14 d
	9	0.70 ± 0.07 c	2.22 ± 0.14 bc	2.92 ± 0.21 a	4.17 ± 0.14 b	1.36 ± 0.02 b	5.53 ± 0.16 b
	12	0.78 ± 0.15 c	1.74 ± 0.22 c	2.62 ± 0.37 a	3.07 ± 0.22 c	1.50 ± 0.12 b	4.57 ± 0.10 c
	15	0.62 ± 0.04 c	2.91 ± 0.29 a	3.52 ± 0.32 a	5.15 ± 0.14 a	1.44 ± 0.02 b	6.59 ± 0.12 a
甘农 9 号 Gannong No. 9	0	0.85 ± 0.05 a	2.12 ± 0.45 a	2.97 ± 0.40 a	2.46 ± 0.14 ab	2.68 ± 0.22 a	5.15 ± 0.37 a
	6	0.63 ± 0.05 a	2.14 ± 0.18 a	2.77 ± 0.23 a	2.40 ± 0.07 ab	3.16 ± 0.24 a	5.56 ± 0.31 a
	9	0.56 ± 0.16 a	2.66 ± 0.03 a	3.22 ± 0.20 a	1.54 ± 0.39 b	1.76 ± 0.35 b	3.31 ± 0.75 b
	12	0.51 ± 0.07 a	2.24 ± 0.16 a	2.75 ± 0.09 a	3.24 ± 0.37 a	2.92 ± 0.16 a	6.16 ± 0.21 a
	15	0.71 ± 0.14 a	2.37 ± 0.08 a	3.08 ± 0.06 a	2.35 ± 0.35 ab	2.73 ± 0.06 a	5.08 ± 0.41 a

数据为平均值 ± 标准误，同列数据后不同小写字母表示同一茬次不同处理间差异显著（$P<0.05$，Duncan 氏新复极差法）。Data are mean ± *SE*, and those of the same cutting in the same column followed by different letters are significantly different ($P<0.05$, Duncan' new multiple range test) among different treatments.

2.2.2　不同施钾水平下蓟马虫口数量与苜蓿受害指数的相关性：相关性分析发现，在不同钾处理下，苜蓿植株上的成虫和若虫数量均与苜蓿受害指数无显著的相关关系。第 2 茬甘农 3 号和甘农 9 号成虫和若虫数量与受害指数相关性分析的公式分别为 $y=14.65x-3.682$，$r^2=0.086$ 和 $y=-6.241x+54.71$，$r^2=0.022$。第 3 茬甘农 3 号和甘农 9 号成虫和若虫数量与受害指数相关性分析的公式分别为 $y=14.65x-3.682$，$r^2=0.086$ 和 $y=-6.241x+54.71$，$r^2=0.022$。

2.3　不同施钾水平下苜蓿叶片钾含量及其与苜蓿受害指数的相关性

2.3.1　苜蓿叶片钾含量的变化：由表 3 可知，第 2 茬中，在心叶中，除 6 g/m^2 水平，甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的钾含量均随钾水平的升高而显著上升（$P<0.05$）；在老叶中，相对于 0 g/m^2 钾处理，甘农 9 号和甘农 3 号苜蓿的叶片钾含量均随钾水平的升高而上升，但在 9，12 和 15 g/m^2 水平下甘农 3 号的钾含量差异不显著（$P>0.05$）；甘农 3 号和甘农 9 号在 6 g/m^2 水平下叶片钾含量均显著高于其他钾水平。第 3 茬中，相对于 0 g/m^2 处理，在心叶中，除 6 g/m^2 水平，甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的钾含量均随钾水平的升高而显著上升（$P<0.05$）。在老叶中，甘农 9 号和甘农 3 号苜蓿的钾含量均随钾水平的升高而上升，两个品种在 6 g/m^2 水平下钾含量均显著高于其他钾水平（$P<0.05$）。从表 3 也可以发现，同一施钾处理下，第 2 茬苜蓿心叶和老叶中的钾含量较第 3 茬高。

2.3.2　苜蓿叶片钾含量与苜蓿受害指数的相关性：相关性分析发现，苜蓿的受害指数均与心叶钾含量不显著的负相关关系。第 2 茬甘农 3 号和甘农 9 号叶片含钾量与受害指数相关性分析的公式分别为 $y=-64.892x+240.02$，$r^2=0.413$ 和 $y=-37.747x+150.92$，$r^2=0.282$；第 3 茬甘农 3 号和甘农 9 号叶片含钾量与受害指数相关性分析的公式分别为 $y=-44.897x+193.46$，$r^2=0.358$ 和 $y=-22.022x+124.39$，$r^2=0.247$。两茬苜蓿老叶中的钾含量与受害指数无相关性。

2.4　不同施钾水平下苜蓿叶片营养物质含量的变化

2.4.1　苜蓿心叶中糖、氮含量及碳氮比的变化：由

表 3 不同钾水平下甘农 3 号和甘农 9 号叶片钾含量的变化

Table 3 Change in the potassium content in Gannong No. 3 and Gannong No. 9 leaves after exposure to different potassium levels

茬次 Cuttings	钾浓度 Potassium levels (g/m^2 K_2O)	心叶钾含量(mg/kg) Potassium content in heart leaves		老叶钾含量(mg/kg) Potassium content in old leaves	
		甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9	甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9
第 2 茬 2nd cutting	0	2.83 ± 0.03 c	2.83 ± 0.02 c	2.16 ± 0.04 b	2.20 ± 0.01 d
	6	2.87 ± 0.03 c	2.90 ± 0.03 bc	2.36 ± 0.05 a	2.61 ± 0.01 a
	9	3.00 ± 0.01 b	2.97 ± 0.03 b	2.20 ± 0.01 b	2.40 ± 0.03 b
	12	3.01 ± 0.03 b	3.17 ± 0.02 a	2.20 ± 0.05 b	2.32 ± 0.01 c
	15	3.02 ± 0.06 a	3.09 ± 0.06 a	2.18 ± 0.04 b	2.42 ± 0.02 b
第 3 茬 3rd cutting	0	2.63 ± 0.05 c	2.63 ± 0.02 c	1.96 ± 0.05 b	2.02 ± 0.02 d
	6	2.67 ± 0.05 c	2.70 ± 0.03 bc	2.16 ± 0.05 a	2.41 ± 0.01 a
	9	2.81 ± 0.03 b	2.77 ± 0.03 b	2.00 ± 0.01 b	2.21 ± 0.03 b
	12	2.84 ± 0.06 b	2.97 ± 0.02 a	2.00 ± 0.04 b	2.13 ± 0.01 c
	15	2.93 ± 0.11 a	2.89 ± 0.06 a	1.99 ± 0.04 b	2.22 ± 0.01 b

数据为平均值 ± 标准误，同列数据后不同小写字母表示同一茬次不同处理间差异显著($P < 0.05$，Duncan 氏新复极差法)，下表同。Data are mean ± *SE*, and those of the same cutting in the same column followed by different letters are significantly different among different treatments ($P < 0.05$, Duncan' new multiple range test). The same for the following tables.

表 4 不同钾水平下甘农 3 号和甘农 9 号心叶可溶性糖和氮含量及碳氮比的变化

Table 4 Change in the soluble sugar content, nitrogen content and carbon to nitrogen ratio in heart leaves of Gannong No. 3 and Gannong No. 9 after exposure to different potassium levels

茬次 Cuttings	钾浓度 Potassium levels (g/m^2 K_2O)	可溶性糖含量(mg/kg) Soluble sugar content		氮含量(mg/kg) Nitrogen content		碳氮比 Carbon to nitrogen ratio	
		甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9	甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9	甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9
第 2 茬 2nd cutting	0	4.225 ± 0.102 b	4.247 ± 0.184 b	5.676 ± 0.036 a	5.870 ± 0.009 a	0.744 ± 0.014 c	0.723 ± 0.031 b
	6	4.337 ± 0.186 b	5.049 ± 0.196 a	5.551 ± 0.003 b	5.342 ± 0.062 c	0.781 ± 0.033 c	0.945 ± 0.027 a
	9	5.152 ± 0.022 a	5.158 ± 0.003 a	5.559 ± 0.003 b	5.386 ± 0.010 c	0.927 ± 0.004 ab	0.958 ± 0.001 a
	12	5.060 ± 0.051 a	5.324 ± 0.030 a	5.738 ± 0.059 a	5.595 ± 0.001 b	0.882 ± 0.003 b	0.952 ± 0.005 a
	15	5.286 ± 0.011 a	5.180 ± 0.005 a	5.492 ± 0.015 b	5.396 ± 0.014 c	0.963 ± 0.004 a	0.960 ± 0.002 a
第 3 茬 3rd cutting	0	3.104 ± 0.029 c	3.441 ± 0.022 c	4.466 ± 0.036 a	4.660 ± 0.009 a	0.695 ± 0.012 a	0.739 ± 0.006 e
	6	3.350 ± 0.008 bc	3.675 ± 0.028 b	4.341 ± 0.003 b	4.132 ± 0.062 c	0.772 ± 0.001 ab	0.889 ± 0.007 b
	9	3.382 ± 0.001 bc	3.800 ± 0.012 a	4.349 ± 0.003 b	4.176 ± 0.010 c	0.778 ± 0.001 ab	0.910 ± 0.005 a
	12	4.004 ± 0.294 a	3.485 ± 0.022 c	4.528 ± 0.059 a	4.385 ± 0.001 b	0.886 ± 0.077 a	0.795 ± 0.005 d
	15	3.694 ± 0.003 ab	3.499 ± 0.007 c	4.282 ± 0.015 b	4.186 ± 0.014 c	0.863 ± 0.002 a	0.836 ± 0.004 c

表 4 可知，在第 2 茬中，随钾水平的升高，甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿心叶的可溶性糖含量均上升，氮含量均下降，碳氮比均上升。甘农 3 号和甘农 9 号的碳氮比均在 15 g/m^2 水平达到最大值，与 0 g/m^2 差异显著($P < 0.05$)。第 3 茬中，甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的可溶性糖含量、氮含量和碳氮比均与第 2 茬的变化规律相同，其中甘农 3 号和甘农 9 号的碳氮比分别在 12 和 9 g/m^2 水平达到最大值，与 0 g/m^2 差异显著($P < 0.05$)，甘农 3 号在 12 g/m^2 水平糖含量最高，甘农 9 号在 9 g/m^2 水平下可溶性糖含量显著高于其他钾水平($P < 0.05$)。甘农 3 号和甘农 9 号在 15 和 6 g/m^2 水平下氮含量最低，均与 0 g/m^2 差异显著($P < 0.05$)。

2.4.2 苜蓿老叶中可溶性糖、氮含量和碳氮比的变化：由表 5 可知，在第 2 茬中，随钾水平的升高，甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿老叶的可溶性糖含量均上升，甘农 3 号的氮含量下降而甘农 9 号的氮含量上升，两者的碳氮比均上升，甘农 3 号和甘农 9 号的碳氮比分别在 9 和 15 g/m^2 水平达到最大值，均与 0 g/m^2 差异显著($P < 0.05$)。第 3 茬中，甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的可溶性糖含量、氮含量和碳氮比均与第 2 茬的变化规律相同，其中甘农 3 号和甘农 9 号的碳氮比分别在 15 和 12 g/m^2 水平达到最大值，甘农 3 号在 15 g/m^2 水平下可溶性糖含量最高，但与 9 g/m^2 水平差异不显著($P > 0.05$)，甘农 9 号在 12 g/m^2 水平下可溶性糖含量显著高于其他钾水平($P < 0.05$)，甘农 3 号在 15 g/m^2 水平下氮含量显著低于其他水平($P < 0.05$)，甘农 9 号在 6 g/m^2 水平

表 5　不同钾水平下甘农 3 号和甘农 9 号老叶可溶性糖和氮含量及碳氮比的变化

Table 5　Change in the soluble sugar content, nitrogen content and carbon to nitrogen ratio in old leaves of Gannong No. 3 and Gannong No. 9 after exposure to different potassium levels

茬次 Cuttings	钾浓度 Potassium levels (g/m^2 K_2O)	可溶性糖含量(mg/kg) Soluble sugar content		氮含量(mg/kg) Nitrogen content		碳氮比 Carbon to nitrogen ratio	
		甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9	甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9	甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9
第 2 茬 2nd cutting	0	6.045 ±0.008 d	5.975 ±0.036 c	5.220 ±0.012 b	5.095 ±0.012 c	1.158 ±0.001 d	1.173 ±0.003 c
	6	6.702 ±0.166 c	6.539 ±0.182 b	5.341 ±0.009 a	5.052 ±0.010 c	1.255 ±0.033 c	1.295 ±0.039 b
	9	7.631 ±0.132 a	7.727 ±0.342 a	5.181 ±0.044 b	5.220 ±0.043 b	1.473 ±0.013 a	1.384 ±0.054 ab
	12	7.397 ±0.042 ab	7.483 ±0.213 a	5.299 ±0.023 a	5.298 ±0.005 a	1.396 ±0.010 b	1.412 ±0.041 ab
	15	7.170 ±0.125 b	7.678 ±0.132 a	4.920 ±0.005 c	5.367 ±0.022 a	1.457 ±0.027 ab	1.431 ±0.019 a
第 3 茬 3rd cutting	0	4.127 ±0.024 b	4.589 ±0.023 d	5.010 ±0.012 b	4.885 ±0.012 c	0.824 ±0.007 b	0.939 ±0.007 c
	6	4.493 ±0.188 b	5.138 ±0.027 c	5.131 ±0.009 a	4.842 ±0.010 c	0.875 ±0.038 b	1.061 ±0.003 b
	9	4.758 ±0.391 ab	5.337 ±0.067 b	4.971 ±0.044 b	5.010 ±0.043 b	0.958 ±0.083 b	1.066 ±0.023 b
	12	4.252 ±0.002 b	5.688 ±0.060 a	5.089 ±0.023 a	5.088 ±0.005 a	0.836 ±0.003 b	1.118 ±0.013 a
	15	5.321 ±0.248 a	5.398 ±0.031 b	4.710 ±0.005 c	5.157 ±0.022 a	1.130 ±0.054 a	1.047 ±0.010 b

下氮含量显著低于 9，12 和 15 g/m^2 钾水平($P<0.05$)。

2.4.3　苜蓿心、老叶中游离氨基酸含量的变化：由表 6 可知，第 2 茬中，甘农 3 号和甘农 9 号心叶和老叶中游离氨基酸的含量均随着钾水平的上升而降低，心叶中，甘农 3 号和甘农 9 号的游离氨基酸含量和变化率分别在 6 和 12 g/m^2 水平最低，均与 0 g/m^2 水平差异显著($P<0.05$)；老叶中，甘农 3 号的游离氨基酸含量和变化率在 12 g/m^2 水平最低，与 0 g/m^2差异显著($P<0.05$)，甘农 9 号的游离氨基酸含量和变化率在 12 g/m^2 水平显著低于其他钾水平($P<0.05$)。第 3 茬中，游离氨基酸变化规律和第 2 茬相似，均随着钾水平的上升而降低，心叶中，甘农 3 号和甘农 9 号的游离氨基酸含量和变化率在 9 和 12 g/m^2 水平达到最小值，均与 0 g/m^2 水平差异显著($P<0.05$)；老叶中，甘农 3 号和甘农 9 号的游离氨基酸含量和变化率均在 6 g/m^2 水平最低，且均与 0 g/m^2 水平差异显著($P<0.05$)。第 3 茬两个苜蓿品种叶片中的游离氨基酸含量低于第 2 茬。

表 6　不同钾水平下甘农 3 号和甘农 9 号叶片游离氨基酸含量的变化

Table 6　Change in free amino acid content in Gannong No. 3 and Gannong No. 9 leaves after exposure to different potassium levels

茬次 Cuttings	钾浓度 Potassium levels (g/m^2 K_2O)	心叶氨基酸含量(mg/g) Amino acid content in heart leaves				老叶氨基酸含量(mg/g) Amino acid content in old leaves			
		甘农 3 号 Gannong No. 3	变化率 Rate of change (%)	甘农 9 号 Gannong No. 9	变化率 Rate of change (%)	甘农 3 号 Gannong No. 3	变化率 Rate of change (%)	甘农 9 号 Gannong No. 9	变化率 Rate of change (%)
第 2 茬 2nd cutting	0	155.621 ±1.522 a	–	157.337 ±0.298 a	–	170.307 ±1.357 a	–	150.778 ±0.466 a	–
	6	154.488 ±1.383 a	−0.73	141.396 ±1.184 c	−10.13	152.584 ±0.891 b	−10.41	144.971 ±0.429 b	−3.85
	9	149.632 ±1.553 b	−3.85	141.777 ±2.255 c	−9.89	152.518 ±1.752 b	−10.45	139.377 ±2.626 c	−7.56
	12	144.299 ±0.858 c	−7.28	149.936 ±0.842 b	−4.70	147.185 ±0.694 bc	−13.58	134.498 ±1.134 d	−10.80
	15	146.359 ±1.127 bc	−5.95	149.220 ±1.055 b	−5.16	149.978 ±0.792 c	−11.94	141.826 ±0.798 bc	−5.94
第 3 茬 3rd cutting	0	111.459 ±0.596 a	–	115.174 ±0.993 a	–	114.192 ±0.878 a	–	113.247 ±1.363 a	–
	6	104.628 ±0.857 b	−6.13	102.478 ±1.668 b	−11.02	96.173 ±2.701 b	−15.78	94.591 ±1.206 c	−16.47
	9	102.028 ±0.798 bc	−8.46	102.435 ±1.240 b	−11.06	98.191 ±3.846 b	−14.01	98.409 ±2.830 c	−13.10
	12	100.222 ±1.610 c	−10.08	105.441 ±0.548 b	−8.45	98.786 ±0.602 b	−13.49	107.247 ±2.269 b	−5.30
	15	109.047 ±1.415 a	−2.16	102.653 ±0.309 b	−10.87	97.367 ±1.512 b	−15.78	106.538 ±0.911 b	−5.92

3　讨论

抗逆元素钾不仅可以通过调节植物体内的物质(可溶性氮、糖分、卵磷脂、氨基酸、拒食剂、水分等)影响昆虫对寄主的选择性(张福琐，1993；孙小花等，2015)，而且在改善植物虫害发生及耐害性方面有着积极的作用(石卫东，2011)。常德垄和王存午

(2002)研究发现,增施钾肥对提高棉株的耐蚜力效果显著。吴晖等(2004)研究表明,土壤的速效钾含量越高,锥栗品种对栗瘿蜂 *Dryocosmus kuriphilus* 的抗性越强。增施钾肥后,苜蓿抗苜蓿斑蚜的性状均有所增强(Smith, 1993)。在本研究中,随着钾水平的升高,两个苜蓿品种的受害指数均显著降低,但不同施钾水平下苜蓿的虫口密度与受害指数无显著相关性,说明施钾可能主要提高了苜蓿对蓟马的耐害性,这与前人的研究结果相似。蓟马主要在苜蓿心叶中取食为害,两个品种心叶中的钾含量随着钾水平的上升而上升,而施钾后抗性较低的甘农 3 号的受害程度表现表明,施钾可有效提高感蓟马苜蓿的抗性,这与大豆蚜 *Aphis glycines* 的各项生命表参数及其对寄主的选择性随植物钾营养水平的提高而降低的研究结果相一致(Myers and Gratton, 2006)。而施钾后两个苜蓿品种心叶钾含量与受害指数的相关性分析结果表明,钾对苜蓿抗蓟马性的增强可能不是叶片的钾素营养,而是通过调节苜蓿的其他生理变化来实现的。

钾是多种酶的活化剂,不仅可以促进光合作用,还可以促进氮代谢,提高植物对氮的吸收和利用,增强植物的抗不良因素的能力(魏永胜和梁宗锁, 2001)。而植物对植食性昆虫的作用一般以营养成分和次生物质的变化来影响昆虫的行为、生长发育和繁殖(钦俊德, 1987)。植物的营养物质主要包括糖类、氨基酸、蛋白质等,其中研究多集中在可溶性糖、游离氨基酸与植物抗虫性的关系方面。李进步等(2008)和芦屹等(2009)研究报道,不同抗虫棉花品种可溶性糖含量与抗蚜程度呈显著正相关;李跃强等(2003)报道,模拟棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 为害后,棉花叶中可溶性糖含量升高而游离氨基酸含量降低。陈青(2002)研究报道,抗蚜辣椒品种叶组织氮含量较低,碳氮比较高。在本研究中,随着钾水平的升高,两个苜蓿品种的心叶和老叶中可溶性糖均升高,游离氨基酸含量均下降,碳氮比上升,受害指数下降,说明钾元素可通过提高苜蓿叶片中的糖含量、以及降低氮含量和游离氨基酸含量来提高其对蓟马的抗性。

施钾后的两个苜蓿品种受害指数均降低,尽管感蓟马品种甘农 3 号的受害指数仍高于抗蓟马品种甘农 9 号,但施钾后的甘农 3 号的受害指数均低于未施钾的甘农 9 号的受害指数;相对于未施钾的甘农 9 号苜蓿,施钾后的甘农 3 号苜蓿叶片中与抗虫性相关的营养物质含量的变化,尤其是蓟马主要取食为害的心叶营养物质的变化较为明显,说明施钾可有效提高感虫品种对蓟马的抗性,也说明通过施钾来提高感蓟马苜蓿对蓟马抗性的是可行的。

本研究仅初步探讨了钾元素可通过调控苜蓿可溶性糖、氮以及氨基酸含量,进而提高了苜蓿对蓟马的耐害性,但对于苜蓿大田如何合理施用钾元素,以使苜蓿在蓟马为害高峰期的 7、8 月份均获得较高的耐害性,以及钾元素对于苜蓿抗蓟马的其他方面的调控机理,如次生代谢物质或苜蓿组织结构等有待进一步深入研究。

参考文献 (References)

Bao SD, 2000. Agriculture Chemical Analysis of Soil. China Agriculture Press, Beijing. 268 – 271. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社. 268 – 271]

Chang DY, Wang CW, 2002. Effect of the measurement of applying fertilizer on aphid resistance and aphid endurance of cotton. *Journal of Huaibei Coal Industry Teachers College*, 23(2): 60 – 62. [常德鋆, 王存午, 2002. 施肥措施对棉株抗蚜和耐蚜力的影响. 淮北煤师院学报, 23(2): 60 – 62]

Chen Q, 2002. A study on the correlation between several chemical substances and capsicum cultivar resistance to *Myzus persicae* (Sulzer). *Acta Horticulturae Sinica*, 29(6): 533 – 536. [陈青, 2002. 几种生化物质与辣椒抗蚜性的相关性. 园艺学报, 29(6): 533 – 536]

Dai XH, You MS, Fu LJ, 2002. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium via leaf on host-selection by *Liriomyza sativae*. *Acta Entomologica Sinica*, 45(1): 145 – 147. [戴小华, 尤民生, 傅丽君, 2002. 氮、磷、钾对美洲斑潜蝇寄主选择性的影响. 昆虫学报, 45 (1): 145 – 147]

Du XH, 2014. The Response of Aphids Density to Potassium Levels and Its Physiological and Biochemical Mechanism of Wheat. MSc Thesis, Henan Agricultural University, Zhengzhou. [杜新慧, 2014. 麦株蚜虫密度对供钾水平的响应及其生理生化机制. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文]

Gao D, He XH, Zhu YY, 2010. Review of advances in mechanisms of sustainable management of pests by agro-biodiversity. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34(9): 1107 – 1116. [高东, 何霞红, 朱有勇, 2010. 农业生物多样性持续控制有害生物的机理研究进展. 植物生态学报, 34(9): 1107 – 1116]

Han YL, 2013. Effects of Potassium Supply on Chlorophyll Fluorescence Traits and Metabolism of Carbon and Nitrogen under Low Light Stress on Winter Wheat. MSc Thesis, Henan Agricultural University, Zhengzhou. [韩玉龙, 2013. 施钾对弱光胁迫下冬小麦叶绿素荧光特性及碳、氮代谢的影响. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文]

He CG, 2004. Alfalfa Disease, Pests, Rodent Damage and Prevention Measures. China Agriculture Press, Beijing. 27 – 29. [贺春贵, 2004. 苜蓿病虫草鼠害防治. 北京: 中国农业出版社. 27 – 29]

He CG, Wang SS, Cao ZZ, Wei ZW, Feng HW, 2007. Field evaluation

on resistance of 40 *Medicago* cultivars (lines) to thrips. *Acta Prataculturae Sinica*, 16(5): 79 - 83. [贺春贵, 王森山, 曹致忠, 魏臻武, 冯会文, 2007. 40 个苜蓿品种(系)对蓟马田间抗性评价. 草业学报, 16(5): 79 - 83]

Hu GX, He CG, Wang SS, Du WH, 2007. Study on resistance mechanism of *Medicago sativa* to *Odontothrips loti*. *Pratacultural Science*, 24(9): 86 - 89. [胡桂馨, 贺春贵, 王森山, 杜文华, 2007. 不同苜蓿品种对牛角花齿蓟马的抗性机制初步研究. 草业科学, 24(9): 86 - 89]

Kou JT, Hu GX, Zhang XY, Shi SL, Zhu B, 2011. Research of growth characteristics of resistant and susceptible alfalfa clones continuously damaged by thrips. *Grassland and Turf*, 31(4): 35 - 40. [寇江涛, 胡桂馨, 张新颖, 师尚礼, 朱博, 2011. 持续危害下抗, 感蓟马苜蓿无性系大田生长特性研究比较. 草原与草坪, 31(4): 35 - 40]

Li JB, Fang LP, Lv ZZ, Zhang Z, 2008. Relationships between the cotton resistance to the cotton aphid (*Aphis gossypii*) and the content of soluble sugars. *Plant Protection*, 34(2): 26 - 30. [李进步, 方丽平, 吕昭智, 张铮, 2008. 棉花抗蚜性与可溶性糖含量的关系. 植物保护, 34(2): 26 - 30]

Li YQ, Xuan WJ, Wang HT, Sheng CF, 2003. Physiological mechanism of over-compensation by cotton plants for simulated boll-worm infestation on early squares. *Acta Entomologica Sinica*, 46(3): 267 - 271. [李跃强, 宣维健, 王红托, 盛承发, 2003. 棉花对棉铃虫为害超补偿作用的生理机制. 昆虫学报, 46(3): 267 - 271]

Lu W, Hou ML, Wen JH, Li JW, 2007. Effects of host potassium nutrition on development, survival and host selection of *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Acta Entomologica Sinica*, 50(3): 253 - 258. [卢伟, 侯茂林, 文吉辉, 黎家文, 2007. 寄主钾营养对烟粉虱发育、存活和寄主选择的影响. 昆虫学报, 50(3): 253 - 258]

Lu Y, Wang PL, Liu B, Zhang J, Zhou ZY, 2009. Resistance and relevant mechanism to *Aphis gossypii* Glover of main cotton varieties in Xinjiang. *Cotton Science*, 21(1): 57 - 63. [芦屹, 王佩玲, 刘冰, 张金, 周子扬, 2009. 新疆棉花主栽品种的抗蚜性及其机制研究. 棉花学报, 21(1): 57 - 63]

Myers SW, Gratton C, 2006. Influence of potassium fertility on soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura (Hemiptera: Aphididae), population dynamics at a field and regional scale. *Environmental Entomology*, 35(2): 219 - 227.

Pang ST, Dong YH, 2012. Effects of soil fertilization on herbivores infestation. *Soils*, 44(5): 719 - 726. [庞淑婷, 董元华, 2012. 土壤施肥与植食性害虫发生为害的关系. 土壤, 44(5): 719 - 726]

Perrenoud S, 1990. Potassium and Plant Health. IPI Research Topics No. 3. International Potash Institute, Worblaufen-Bern, Switzerland. 142 - 147.

Qin JD, 1987. Insect-Plant Relationship. Science Press, Beijing. 22 - 29. [钦俊德, 1987. 昆虫与植物的关系. 北京: 科学出版社. 22 - 29]

Shi WD, 2011. Effect of N and K Combined Application on Aphid-resistance and Some Biochemical Substance Content in Wheat. MSc Thesis, Henan Agricultural University, Zhengzhou. [石卫东, 2011. 氮、钾及其配施对小麦抗蚜性及若干生化指标的影响. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文]

Smith CM (translated by Feng MG), 1993. A Fundamental Approach for Plant Resistance to Insects. China Agriculture Science and Technology Press, Beijing. 69 - 79. [Smith CM(冯明光 译), 1993. 植物抗虫性的研究与应用. 北京: 中国农业科技出版社. 69 - 79]

Sun XH, Xie YP, Niu JY, Li AR, 2015. Effect of potassium application rate on uptake and distribution of potassium and grain yield in oil flax. *Acta Prataculturae Sinica*, 24(4): 30 - 38. [孙小花, 谢亚萍, 牛俊义, 李爱荣, 2015. 不同施钾水平对胡麻钾素营养转运分配及产量的影响. 草业学报, 24(4): 30 - 38]

Wei YS, Liang ZS, 2001. Relationship between potassium and drought resistance of crops. *Plant Physiology Communications*, 37(6): 576 - 580. [魏永胜, 梁宗锁, 2001. 钾与提高作物抗旱性的关系. 植物生理学通讯, 37(6): 576 - 580]

Wu H, Chen SL, Huang JC, Ye XY, Deng XM, Huang HQ, 2004. Resistance index of *Castanea henryi* (Skan) Rehd. *et* Wils. against *Dryocosmus kuriphilus* Yasumatus. *Journal of Fujian College of Forestry*, 24(4): 344 - 348. [吴晖, 陈顺立, 黄金聪, 叶小瑜, 邓秀明, 黄红青, 2004. 锥栗品种抗栗瘿蜂性状的评价. 福建林学院学报, 24(4): 344 - 348]

Wu YF, Zhao XH, Temuerbuhe, 1990. The thrips are main injurious insects of alfalfa production in China. *Grassland of China*, (3): 65 - 66. [吴永敷, 赵秀华, 特木尔布和, 1990. 蓟马是我国苜蓿生产的主要害虫. 中国草地, (3): 65 - 66]

Yang QC, Sun Y, 2011. The history, current situation and development of alfalfa breeding in China. *Chinese Journal of Grassland*, 33(6): 95 - 100. [杨青川,孙彦, 2011. 中国苜蓿育种的历史、现状与发展趋势. 中国草地学报, 33(6): 95 - 100]

Zhang FS, 1993. Plant Nutrition Ecological Physiology and Genetics. Beijing Agricultural University Press, Beijing. 179 - 205. [张福琐, 1993. 植物营养生态生理学和遗传学. 北京: 北京农业大学出版社. 179 - 205]

Zhang R, Ma JH, Wang JH, Ren XS, 2003. The occurrence and control strategy of alfalfa disease and insects in Ningxia. *Pratacultural Science*, (6): 40 - 44. [张蓉, 马建华, 王进华, 任学山, 2003. 宁夏苜蓿病虫害发生现状及防治对策. 草业科学, (6): 40 - 44]

(责任编辑: 赵利辉)